

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ  
И  
МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

ТОМ 61

5

*ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК*

1986

МВТУ имени Н. Э. Баумана

Поступило в редакцию  
25 июля 1985 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатченко В. А. Магнитная структура тонких магнитных пленок и ФМР. — ЖЭТФ, 1968, **54**, вып. 1, с. 303—311.
2. Лесник А. Г. Наведенная магнитная анизотропия. Киев: Наукова думка, 1976, 162 с.
3. Growthier T. S. Angular and magnetite dispersion of the anisotropy in magnetic films. — J. Appl. Phys., 1962, **33**, № 10, p. 1769.
4. Лесник А. Г. Статистическая трактовка магнитных свойств пленок, зависящих от дисперсии анизотропии. — ФММ, 1969, **27**, вып. 6, с. 1000—1010.
5. Корнев Ю. В., Бородин Т. В. Зависимость магниторезистивного эффекта от дисперсных свойств пермаллоевых пленок с учетом угловой пространственной дисперсии анизотропии. — ФММ, 1983, **55**, вып. 3, с. 472—478.
6. Суху Р. Магнитные тонкие пленки. М.: Мир, 1967, с. 267.
7. Кирсанов Г. Г., Корнев Ю. В., Семенов Д. И., Сидоренков В. В. Особенности ФМР в тонких пленках с угловой дисперсией магнитной анизотропии. — ФММ, 1986, **61**, вып. 4, с. 750—755.

УДК 669.71 : 537.311.31 : 538.6

## РАЗМЕРНЫЙ И ЧАСТОТНЫЙ ЭФФЕКТЫ В АЛЮМИНИИ

В. И. Гостищев, А. А. Дрозд, В. П. Соболев, Т. А. Криворучко

Сопротивление проводника в магнитном поле существенно зависит от неоднородности электрического поля, обусловленной как размерным эффектом, так и магнитным полем [1]. Одной из причин возникновения такой неоднородности может явиться скин-эффект в переменном электромагнитном поле. В этом случае можно ожидать изменения зависимости сопротивления проводника от магнитного поля.

В настоящем сообщении показаны некоторые особенности влияния поперечного магнитного поля на сопротивление алюминия при квазистационарном электропереносе (в области частот  $f = 20\text{--}100$  Гц).

В эксперименте изучалось сопротивление тонких проволок из высокочистого алюминия постоянному и низкочастотному переменному току при температуре жидкого гелия. Образцы А1-1 и А1-2 (проволоки  $\varnothing 3 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-4}$  м соответственно) наматывались безындуктивно в спирали таким образом, что реактивная составляющая полного импеданса в исследуемой области частот была значительно меньше активных потерь. Для частотных измерений применялась мостовая схема [2]. Образец являлся плечом моста, одна из диагоналей которого служила нагрузкой генератора переменного тока, в другую был включен селективный усилитель, выполняющий функцию нуля-индикатора. Мост находился в магнитном поле сверхпроводящего соленоида при температуре жидкого гелия; для исключения влияния магнитного поля и температуры на величину сопротивления плеч моста они изготовлялись из нержавеющей стали. Регистрация величин сопротивления плеч моста после его балансировки осуществлялась потенциометрически на постоянном токе, при этом в схеме использовался низкоомный переключатель режима измерений (рис. 1). Переключатель состоит из подвижного элемента и токосъемных контактов. Подвижной элемент представляет собой короткозамкнутый медный стакан 1 и полый, разрезанный по диаметру цилиндр 2, напрессованные на единый шток. Полый цилиндр соединен с источником постоянного тока. При выдвигении штока центральные токосъемные контакты 3 либо короткозамкнуты (реализуется режим измерений на переменном токе; данное положение штока изображено на рис. 1), либо к ним подключается разрезанный цилиндр (в нижнем положении штока), — при этом мост подключается к источнику постоянного тока. С целью устранения наводок все элементы моста, переключатель и токопроводы экранированы.

На рис. 2 представлено статическое сопротивление  $\rho$  и сопротивление  $R$  переменному току частотой 20 Гц образцов А1-1 и А1-2 в зависимости от приложенного поперечного магнитного поля. В сильных полях наблюдается линейный рост сопротивления с увеличением напряженности магнитного поля, более тонкий образец обнаруживает большее сопротивление. Характерные зависимости поверхностного импеданса данных образцов от напряженности магнитного поля показаны на рис. 3, где приведено относительное поверхностное сопротивление образцов при различных частотах, приведенное к сопротивлению на частоте 20 Гц ( $R_i/R_{20}$ ).

Для образца Al-1 магнитное поле  $\sim 1$  кЭ существенно подавляет рост потерь с частотой, а для Al-2 зависимость относительного поверхностного сопротивления от частоты отсутствует. Различный характер частотной зависимости относительного поверх-

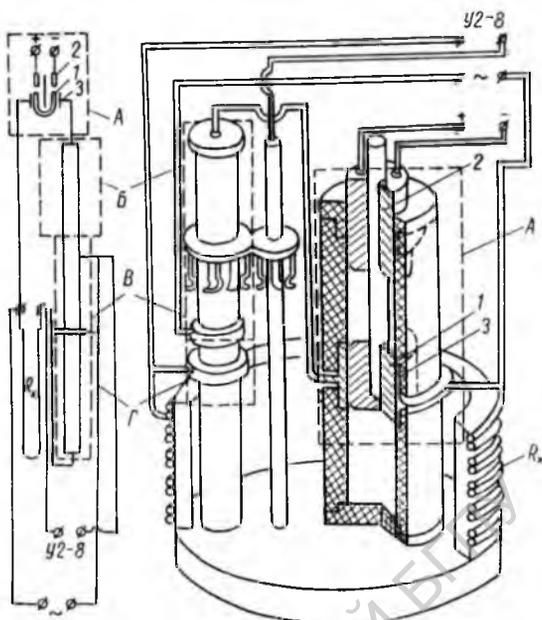


Рис. 1. Функциональная схема низкотемпературной ячейки:

A — переключатель измерений; Б, В, Г — плечи моста;  $R_s$  — исследуемый образец.

ного сопротивления образцов Al-1 и Al-2 свидетельствует о критичности размера образца по отношению к этой величине.

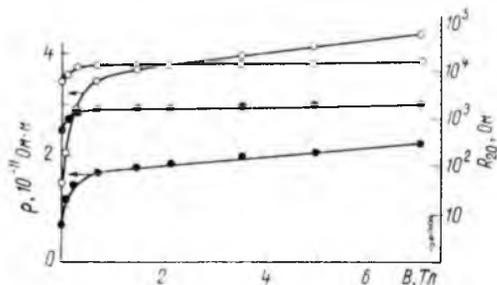


Рис. 2. Зависимость статического сопротивления и поверхностного сопротивления на частоте 20 Гц образцов Al-1 (●) и Al-2 (○) от напряженности поперечного магнитного поля.

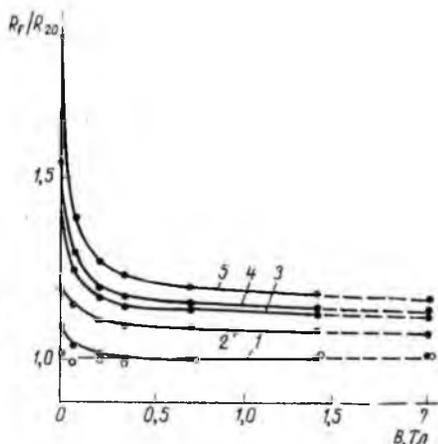


Рис. 3. Зависимости относительного поверхностного сопротивления  $R_s/R_{20}$  образцов Al-1 (●) и Al-2 (○) от напряженности поперечного магнитного поля при различных частотах:

1 —  $f=33$ ; 2 — 61; 3 — 77; 4 — 87; 5 — 100 Гц.

Статическое сопротивление ведет себя в соответствии с размерным эффектом для случая, когда поперечные размеры образца (диаметр  $d$ ) меньше длины свободного пробега для внутриобъемных столкновений  $l$ , то есть  $d < l$ . При этом осцилляции зонд-геймеровского типа не наблюдаются, а линейный рост сопротивления с полем свидетельствует о более эффективном рассеянии электронов на областях поверхности об-

разцов, нормальных магнитному полю. Оценка длины свободного пробега  $l$  с помощью аппроксимации Нордгейма и соответствующего объемного сопротивления  $\rho(\infty)$  [3]

$$\rho(d) = \rho(\infty) (1 + l/d)$$

для наших образцов дает:  $l = 6 \cdot 10^{-4}$  м;  $\rho(\infty) = 2,05 \cdot 10^{-12}$  Ом·м.

Увеличение  $R_f/R_{20}$  с частотой, как известно, вызвано скинированием переменного тока. Кривую зависимости  $R_f/R_{20}$  от частоты можно аппроксимировать методом наименьших квадратов с погрешностью меньше 1% степенной зависимостью с показателем степени, зависящим от магнитного поля. Так, для образца А1-1 показатель степени в нулевом магнитном поле равен 0,32, а в магнитных полях напряженностью 0,71; 3,5; 35,5; 71 кЭ он равен 0,15; 0,09; 0,085 и 0,1 соответственно. Для образца А1-2 показатель степени вне зависимости от напряженности магнитного поля стремится к нулю,  $R_f/R_{20}$  близко к единице во всей области частот и магнитных полей. Очень слабая зависимость поверхностного сопротивления образца А1-2 от частоты и магнитного поля свидетельствует об однородности электрического поля по сечению образца, то есть о том, что глубина скин-слоя  $\delta$  велика по сравнению с размером образца  $d$ . Однако следует отметить, что вследствие малости частоты возмущения  $l$  определяется объемным рассеянием, и отсутствие частотной зависимости относительного поверхностного сопротивления нельзя интерпретировать в рамках классического слабовыраженного скин-эффекта, поскольку, например, в работе [4] обоснование локальной связи между полем и током явно требовало малости  $l$  по сравнению с  $\delta$ . В нашем случае для образца А1-2 имеет место соотношение  $d < \delta < l$ , что эквивалентно статическому размерному эффекту.

Аномальное поведение частотной зависимости относительного поверхностного сопротивления образца А1-1, выражающееся в уменьшении показателя степени  $n$  в  $R_f/R_{20} \sim f^n$  с ростом  $H$ , также обусловлено дополнительным вкладом поверхностного рассеяния в проводимость, и, следовательно, в распределение поля по сечению образца, вид которого иной по сравнению со случаем аномального скин-эффекта [5]. Уменьшение проводимости в магнитном поле приводит к росту  $\delta$  и эффективного токопроводящего слоя в данной области частот. В итоге  $R_f/R_{20}$  падает с ростом магнитного поля, однако в сильных полях скорость уменьшения относительного поверхностного сопротивления снижается. По-видимому, для образца А1-1 наблюдаемые явления можно классифицировать как аномальный размерный скин-эффект, и при этом соотношение между характерными параметрами с размерностью длины будет:  $\delta < d < l$ .

Институт физики твердого тела  
и полупроводников  
АН БССР

Поступило в редакцию  
30 июля 1985 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянова Т. В., Песчанский В. Г., Синолицкий В. В. О размерных гальваномангнитных эффектах в тонких металлических проволоках. Препринт ДонФТИ—83—19(74), Донецк, 1983, 39 с.
2. Волошин И. Ф., Фишер Л. М. Методика и результаты измерений электрического сопротивления фольги из алюминия высокой чистоты на переменном токе при  $T = 4,2$  К. — В кн.: Вопросы крио-электротехники и низкотемпературного эксперимента. Киев: Наукова думка, 1976, с. 21—27.
3. Физика металлов. I. Электроны. Под ред. Дж. Займана. М.: Мир, 1972, 464 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982, с. 279.
5. Волошин И. Ф., Кравченко С. В., Фишер Л. М., Ямпольский В. А. Нелинейный аномальный скин-эффект в металлах. — ЖЭТФ, 1985, 88, вып. 4, с. 1460—1469.